[短報]

ドップラーライダー観測データ品質管理手法の開発と性能評価

岩渕 真海*

Development of quality management techniques and performance evaluation of Doppler lidar observation data

Masami IWABUCHI

要旨

高層気象台は 2009 年 9 月に世界気象機関(WMO)の GCOS 基準高層観測網(GRUAN)に登録され，これに伴い同年12月からドップラーライダーLR-09FⅢS(三菱電機(株))を用いた下層大気の風の観測を行っている．このライダーから出力される観測結果の生データには，不自然と思われる観測データが混在している．今回はこのライダーに関するデータ品質管理手法を開発し，10 分平均値のデータセットを作成した．このデータセットを用いて GPS ゾンデ等他の気象観測器と比較することで，当ライダーの基本的な性能を評価した．また，このデータセットを用いた風速の時間−高度断面図を表示する簡易ビューワを作成し，ラジオゾンデやウィンドプロファイラでは捉えられないような細かいスケールの大気の変動現象を視覚的に把握できるようになった．

１．はじめに

天気予報や気候変動監視のために必要な上層大気の観測は，これまでの気球を用いた直接観測に加え，近年はリモートセンシングによる観測が注目されている．高層気象台では 1921 年から小型気球を用いた上空の風の観測を，1922 年からは係留気球を用いた下層大気の気象観測を行ってきた．現在は気球に GPS ゾンデ(Vaisala 製 RS92SGPJ)を取り付けて 1 日 2 回飛揚し，上空約 30km までの気象要素を観測している．

高層気象台等における GPS ゾンデによる高層気象観測では，高い鉛直分解能(約 12m)の観測データが得られる一方で，通常の観測では時間分解能は 12 時間であるため，メソスケールの気象現象の変動を捉えることは困難であった．高層気象台は 2009 年 9 月に GCOS 基準高層観測網(GRUAN)に登録され，これを期に異種観測機器間の相互比較による品質管理のために可搬型ドップラーライダー(三菱電機製 LR-09FⅢS，以後「ライダー」という)が整備され，下層大気の風について連続観測を行うことが可能になった．このライダーによる観測(以後「ライダー観測」という)結果を GPS ゾンデ観測で得られた水平風速・風向と比較した結果，全ての高度においてライダーの風速の方が GPS ゾンデの風速よりも大きいことが示されている(高層気象台：2011)．この原因を調査した所，ライダー観測結果には不自然と思われる観測データが混入しており，この影響を十分に排除しきれていなかったことが判明した．

このため，今回ライダー観測データに対する品質管理手法を開発し，その品質管理を行ったデータセットを用いて GPS ゾンデや JMA-10 型地上気象観測装置(以後「10 型」という)の風向風速計等，他の気象観測器と比較を行うことで，このライダーの性能の再評価を行った．

２．ライダーの概要

２．１ ライダーの観測原理と基本性能

ライダー観測は，ビームパルスを断続的に発射しながら鉛直軸を中心に回転させて大気中のエーロゾルなどからの散乱光を受信し，視線データから得られるスペクトルデータを元に VAD(Velocity Azimuth Display)法(青柳：1986)を用いることで風の東西・南北・鉛直成分を算出している．

ライダーの主な仕様(三菱電機株式会社:2009)を表 1 に，模式図を図 1 に示す．

*高層気象台 観測第二課

表 1　ライダーの主な仕様

距離分解能	30 m	75 m	150 m
観測範囲	30〜600 m	75〜1500 m	150〜3000 m
送信パルス幅	200 ns	500 ns	1000 ns
パルスピークパワー	10 W 以上	7 W 以上	5 W 以上
変復調方式	パルス変調方式		
観測モード	コニカル走査, 上下走査, 左右走査, ポイント		
走査方式	2段ウェッジプリズム方式		
レーザー光波長	1.5〜1.6 μm		
レンジ数	20		
最大観測速度	−30〜+30 m/s		
送信繰り返し周波数	4 kHz		
ビーム偏向角	10 deg/1段		
開口径	φ60 mm 以上		
ウェッジ回転速度	1〜20 deg/s		
パルス積分数	1000〜16000 回		
ウェッジ回転角読取り分解能	0.0375 deg		
取得データ	スペクトルデータ, 視線データ, 風向風速データ		

図 1　ライダーの模式図

２．２ ライダー観測の設定と設置環境

ライダー観測ではいくつかの観測設定パラメータを調整することができ，取得できる高度やデータ取得率・品質が変化する. 高層気象台での通常の観測時の設定を表 2 に示す. この他，観測毎にビームパルスの焦点位置を調整するマイクロメータの微調整を行い，その時の大気状態で最も多くの観測データが得られるようにしている.

ライダーは専用のシェルター内に設置し，観測時には天空開放度を十分に取り，測定データに影響がないようにしている. また，降水・強風により装置に悪影響がある場合には観測は行っていない. ライダーの設置場所の写真を図 2 に示す.

観測結果として得られるデータには，スペクトルデータ，視線データ，風向風速データがある. 今回は算出された風向・風速が記録されている風向風速データ(以後「観測データ」という)を元に解析を行った. 観測データには約 7 秒毎の 20 層に分けられた風のデータが記録されている. 観測データの例を表 3 に示す.

表 2　ライダーの設定

距離分解能	75 m
観測範囲	75〜1500 m
観測モード	コニカル走査
ビーム仰角	79.84 deg
ウェッジ回転速度	5 deg/s
パルス積分数	4000 回
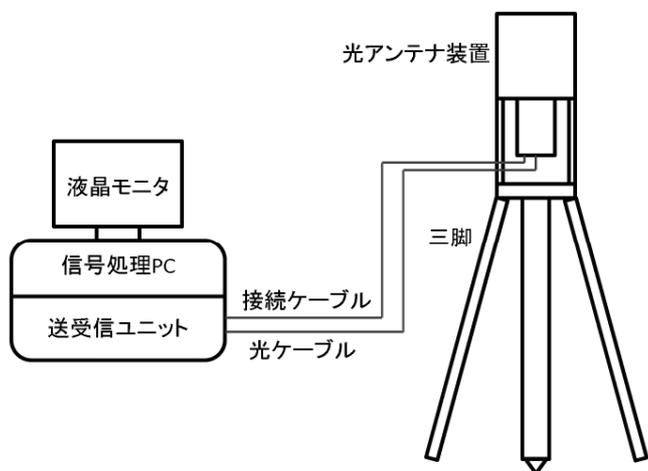
図 2　シェルター内に設置されたライダー

表 3　観測データ例(2011 年 10 月 3 日 08 時 22 分 08 秒)
左列から順に，層番号(Range)，計算に使用したデータ数(Data_Num:最大 73)，地上高度(H)，風速(東西成分(U)，南北成分(V)，鉛直成分(W))，水平合成風(風速(Speed)，風向(Dir)).

Range	Data_Num	H(m)	U(m/s)	V(m/s)	W(m/s)	Speed(m/s)	Dir(deg)
0	72	73.824	1.476	−1.468	−0.446	2.082	314.829
1	72	147.648	0.758	−1.307	−0.383	1.511	329.889
2	72	221.472	1.030	−0.276	−0.141	1.066	284.981
3	72	295.296	−0.545	−0.402	0.111	0.678	53.606
4	72	369.120	−1.642	0.370	0.076	1.683	102.701
5	71	442.944	−2.750	1.272	0.189	3.029	114.824
6	72	516.767	−0.955	−0.861	−0.104	1.286	47.962
7	71	590.591	0.026	0.677	0.146	0.677	182.182
8	71	664.415	0.955	0.945	0.154	1.343	225.318
9	72	738.239	0.814	−1.638	−0.182	1.829	333.572
10	68	812.063	4.126	−1.982	−0.058	4.578	295.661
11	67	885.887	2.864	−6.449	−0.376	7.056	336.059
12	69	959.711	−6.031	0.756	−0.813	6.078	97.142
13	67	1033.535	3.911	−4.345	−0.934	5.846	318.010
14	64	1107.359	1.281	3.126	−1.107	3.378	202.280
15	51	1181.183	1.951	−11.213	−2.119	11.382	350.131
16	47	1255.007	−1.475	−0.921	−3.525	1.739	58.016
17	40	1328.831	37.912	1.664	−1.630	37.948	267.487
18	34	1402.655	7.284	−27.851	−3.894	28.787	345.344
19	32	1476.479	5.461	−7.709	−0.829	9.448	324.686

表 3 の中で，例えば第 17 層目の風速の東西成分 U は 37.912m/s，第 18 層目の風速の南北成分 V は−27.851m/s となっているが，隣接する上下の層の風速に対して不自然に大きな値であり，適切なものではないと考えられる. 観測結果の品質を向上させるためには，観測データからこのような不自然な観測データを除去し，適切な風向・風速を算出する必要がある. そのための品質管理アルゴリズムを以下で紹介する.

３．ライダー観測データの品質管理手法

３．１ ライダー7 秒値の採用の有無の判定

不自然な観測データは主に受信強度が弱い場合に生じる．ライダーの観測プログラムは受信強度が弱い場合は自動的に欠測扱いとしており，受信強度が弱い場合には観測データの Data_Num(計算に使用されたデータの数：7 秒値の算出で最大 73)の値が小さくなる．このため，観測データの信頼性の判定には Data_Num を用いることとした．

採用するデータの最小 Data_Num を変えて, 不自然な観測データの除去と正常データの維持のバランスを調べた結果，Data_Num が 50 以上のデータのみを採用とすることにし，Data_Num が 50 未満のデータは信頼性が不十分であると判定して破棄した．

３．２ データ平均時間の決定

採用となった 7 秒値は，大気中の細かい乱流の効果も受けていると考えられ，観測値にはばらつきがある．このため，他の観測機器と比較するにはある程度時間平均したデータを用いる必要がある．今回は，ウィンドプロファイラや 10 型での 10 分値データとの比較がしやすいことから，ライダーの解析結果も 10 分平均値として算出することにした．

３．３ 風データの信頼性の判定

10 分間に取得できる 7 秒値(正確なサンプリング間隔は 7.2 秒)の個数は，U，V それぞれ最大 84 個となるが，風が乱れている場合や S/N 比が低く不自然な観測データが混じっているような場合にはこのデータの個数は少なくなる．10 分間の観測値の中から採用となった 7 秒値を用いて，風速の東西成分 U および南北成分 V についてそれぞれ 1m/s 単位の風速階級別度数分布を作成し，度数分布のピーク値 V_{mid}(m/s)を中心に±([V_{mid}/5]+2) (m/s)の範囲(以下風計算範囲という)に含まれるデータの個数をカウントした．ここで[ ]はガウス記号で，その値を超えない最も大きな整数を表す記号である．

この風計算範囲に含まれるデータ数が 45 個以上の場合のみ，この範囲内の風速の東西成分 U の平均と V の平均を求め，そこから風速と風向を算出した．この風計算範囲のデータ個数が 45 個未満の場合には信頼性が不十分であると判定して欠測扱いとした．なお，この 45 個という閾値は，不自然な観測データの除去と正常データの維持のバランスを見比べることによって決めた値である．

３．４ データセットと表示ビューワの作成

任意の日付の観測データに対して，上記方法により風の 10 分平均値の鉛直分布(20 層)データセットを PC によって算出するツールを作成した．このツールには，作成したデータセットを視覚的に表示する機能も実装した．データセットの例を表 4 に示す．表示結果は後の**４．５**の図 13 である．

このツールの作成に際しては，簡易で即時的な利用が可能であること，及びプログラムのインストールを必要とせず多くのパソコンで動くことを念頭に置き，開発言語には JavaScript を利用して hta ファイルとして動作させることにし，結果は html ファイルにスタイルシートを用いて表示させた．

４．ライダー観測10分平均値を用いた性能評価

４．１．ライダー7秒値と10分平均値の比較例

ライダーの風速7秒値と風速10分平均値の特性の違いを把握するため, 2011年8月24日のライダー第0層のデータを用いて比較を行った．これを図3に示す．

ライダーの風速7秒値は10分平均値と比較して変動が大きい．これは，大気粒子の局所的な細かい動き，すなわち乱流を捉えているためであると考えられる．これを10分平均値にすることで，より平均的な風の場を表すことができる．7秒値と10分平均値の差はその時の大気の状況によって異なるが，この日の場合は風速差の標準偏差は1.4m/s，差の最大は5.3m/sであった．

４．２ ライダーと10型地上風速計の比較例

10型の風向風速計(以下では「地上風速計」という)の10分平均値とライダー第0層の風速10分平均値の比較を行った．例として，2011年8月24日の観測結果を図4に示す．

地上風速計の設置高度は地上20.4m，ライダー第0層の測定高度は地上73.8m～147.6mの範囲と測定高度が異なるため直接の比較はできないが，ライダーの風速10分平均値の変動の様子は地上風速計の風の変動の様子と対応が良いことが確認できる．また，風が強くなるとこの測定高度の違いの影響がはっきり表れることがわかる．

４．３ ライダーデータ取得率

ライダー観測のデータ取得率は視線方向の分解能やパルス積分数の設定値によって変わり，品質管理手法によっても違いが生じる．高層気象台で通常使用している**２．２**で述べた設定の場合で，今回作成した10分平均値算出のアルゴリズムを適用した場合のデータ取得率を算出した．これを図5に示す．

ライダーの信号受信強度は大気上層ほど弱くなるため，

図5のように大気上層ほどデータ取得率が低下することがわかる．ただし，ライダーの特性上厚い下層雲がある場合には雲底高度までしか観測できないため，ここでのデータ取得率はライダー単体の性能に設置環境での雲等の気象的条件を加えた結果である．

また，平均データ取得高度の年変化の様子を図6に示す．冬期は他の季節に比べてデータ取得高度が低い場合が多い．これは，冬期は湿度が低いことやライダーがターゲットとするエーロゾルが少ないことが原因であると推定される．

４．４ ライダー観測とGPSゾンデ観測の比較

４．４．１ ライダーとGPSゾンデの比較高度の検討と補正

GPSゾンデと厳密な比較を行うため，ライダー観測とゾンデ観測の高度の見直しを行った．

ライダー観測結果に記録される高度は，ライダー本体上面のビーム発射面を基準点として，天頂方向とビームの視線方向の成す角度から三角関数によって算出している．しかし実際の測定高度は，ビームの発信器部分を距離の基準点とするのが正しく，ライダーの三脚の高さや設置場所の地面からの高さも考慮に入れ，より正確な高度を算出して使用した．ライダー設置状況と高度計算の模式図を図7に示す．

GPSゾンデ観測結果に記録される高度は，その時のGPSゾンデの高度が記録されている．従来の観測や研究では，この高度をそのまま使用していることが殆どである．GPSゾンデで観測される風は，ゾンデの位置の変化によって得られるドップラー速度から算出されるが，実際にはゾンデではなく主に気球が受けた風を測定しているものと考えられる．このため，ゾンデの風データの高度としては紐・パラシュートの長さ・気球の半径を用いて計算した気球の中心位置の高度を使用することにした．ゾンデと気球の高度差は，600g気球を用いた観測では18m，1200g気球を用いた観測では35mとした．GPSゾンデの高度計算の模式図を図8に示す．

４．４．２ ライダー観測とGPSゾンデ観測の比較例

ライダーとGPSゾンデの観測結果の比較例として，2011年8月24日の事例を図9に，2011年9月7日の事例を図10に示す．表示要素は，GPSゾンデの2秒値，ライダーの10分平均値，ライダーの7秒値(品質管理なし)である．

図9では，ライダー7秒値は高度1100m以上でGPSゾンデ観測に比べ風速が大きく，風向もやや外れている．一方，品質管理を行った10分平均値ではそのような傾向はなく，全高度においてGPSゾンデ観測値と良く一致している．

表4　10分平均値データセット例(2011年10月3日8時30分)
左列から順に，時刻(時(Hour)，分(Minute))，地上高度(H)，風速(東西成分(U)，南北成分(V)，鉛直成分(W))，水平合成風(風速(Speed)，風向(Dir))，風計算範囲内の採用データ数(東西成分(U_count)，南北成分(V_count)，鉛直成分(W_count))

Hour	Minute	H(m)	U(m/s)	V(m/s)	W(m/s)	Speed(m/s)	Dir(deg)	U_count	V_count	W_count
8	30	74	1.1	−0.3	−0.44	1.1	285	83	83	83
8	30	148	1.3	0.3	−0.39	1.3	257	83	83	83
8	30	221	0.6	0.0	−0.36	0.6	270	83	83	83
8	30	295	0.2	−0.2	−0.34	0.3	315	83	83	83
8	30	369	0.0	−0.6	−0.24	0.6	0	83	83	83
8	30	443	0.0	−0.7	−0.13	0.7	0	83	83	83
8	30	517	−0.3	−1.2	0.02	1.2	14	83	83	83
8	30	591	−0.1	−0.8	0.02	0.8	7	83	83	83
8	30	664	−0.1	0.1	0.08	0.1	135	83	83	83
8	30	738	0.4	0.9	−0.01	1.0	204	83	83	83
8	30	812	0.2	0.7	−0.06	0.7	196	80	83	83
8	30	886	0.0	−3.0	−0.25	3.0	0	55	65	83
8	30	960	2.0	−0.4	−0.77	2.0	281	56	56	83
8	30	1034	1.0	−2.2	−0.58	2.4	336	61	60	83
8	30	1107	4.8	NaN	−0.32	NaN	NaN	58	37	83
8	30	1181	NaN	NaN	−0.35	NaN	NaN	27	30	66
8	30	1255	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	6	15	21
8	30	1329	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	3	3	6
8	30	1403	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	3	3	4
8	30	1476	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0	0	0
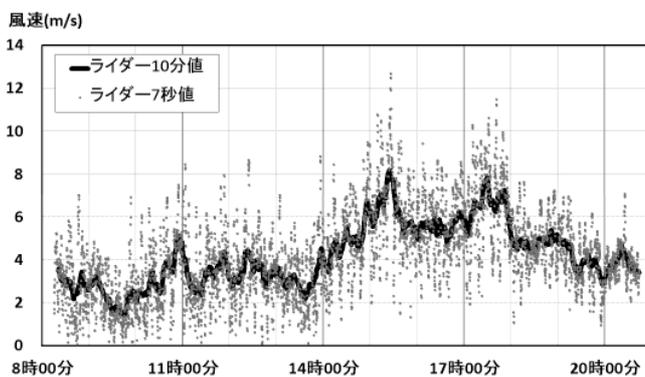
図3　ライダー風速7秒値と10分値(2011年8月24日)
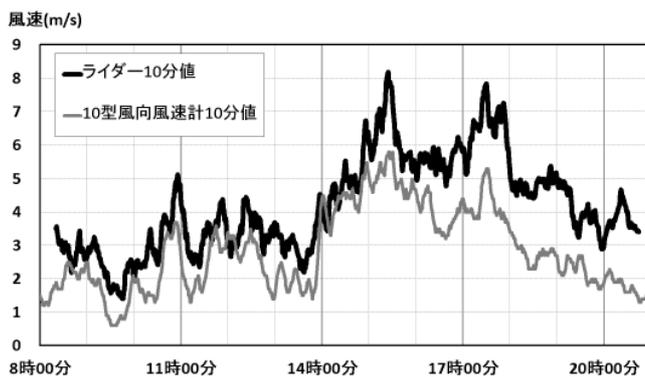
図4　ライダー第0層と10型風向風速計の風速10分値(2011年8月24日)

図10においても，ライダー観測とGPSゾンデ観測のプロファイルは概ね一致しているが，高度900m以下ではGPSゾンデの風速プロファイルに約250mを波長とする周期変
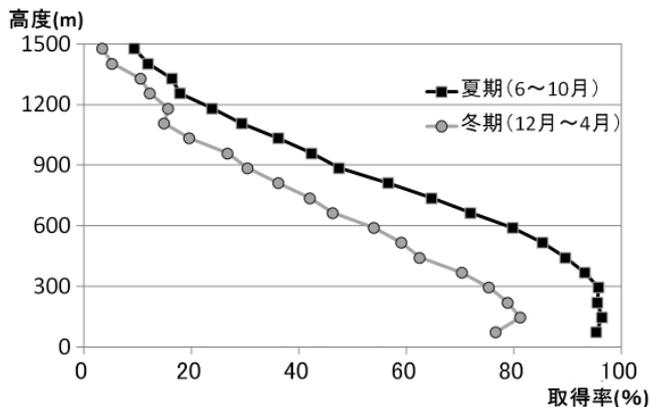
図5　ライダーのデータ取得率(2009年12月～2011年12月)

図6　ライダーの平均データ取得高度の年変化(2009年12月～2011年12月)
エラーバーはデータ取得高度の標準偏差範囲を表す.

化(時間周期約50秒)が見られる．これは，GPSゾンデの風は71秒加重移動平均データを元に作られているが，突風のような瞬間的な風の影響が風速に表れてしまうことや，GPSゾンデが紐に吊るされて揺れていることによる振り子運動の影響を完全に除去しきれていないことが可能性として考えられる．今後さらに詳しく調べて原因を調査したい. GPSゾンデ観測でのこのような風速や風向の周期的な振動は，他の観測でも頻繁に確認されている.

４．４．３ ライダー観測とGPSゾンデ観測の比較系統誤差

４．４．２で行った比較と同様に，ライダーでの観測を開始した2009年12月から2011年12月までのデータを用いて, GPSゾンデ観測での風の観測結果との系統誤差の比較を行った．比較対象としたGPSゾンデ観測は，8時30分飛揚の261事例と20時30分飛揚の252事例の計513事例である．

GPSゾンデの風の高度として，従来どおりのGPSゾンデの位置を高度とした場合と，前述のように気球の中心位置を高度として用いた場合とでそれぞれライダー10分値との比較を行った. ライダーとGPSゾンデの風速差を図11に，風向差を図12に示す.

GPSゾンデの高度として気球の中心位置を使用した場合，ライダーとGPSゾンデの風速差は20層全ての高度で，風向差は20層中18層で標準偏差が小さくなり, GPSゾンデとライダーで観測測定された風の一致性が良くなった．特に地面付近の風速の違いが顕著で，ライダー第0層とゾンデの風速差は平均−0.75m/sから−0.22m/sに差が縮まった．このように, GPSゾンデの2秒値(高度分解能約12m)とライダーの10分値(高度分解能約75m)という高い高度分解能を持つ機器同士の比較では，観測ファイルに記録されている高度を使用せず，より正確な高度を算出して比較することで，有意義な比較結果を求めることができる.

図7　ライダー設置状況と高度計算の模式図

図8　GPS高度とその時観測している風の高度の差
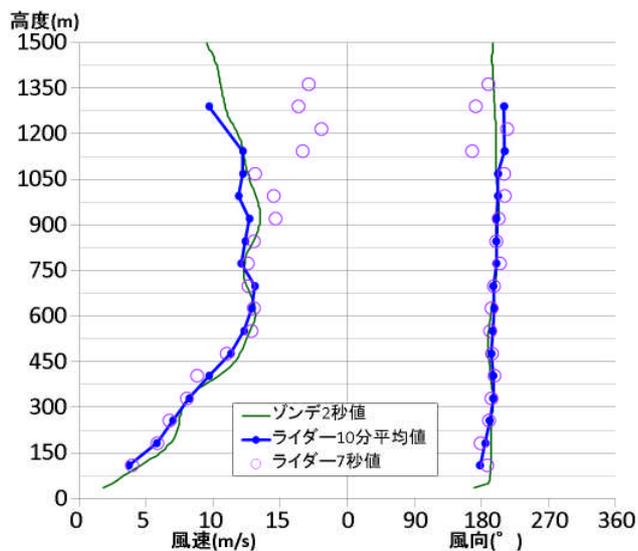
図9　2011年8月24日20時30分のゾンデとライダーの比較
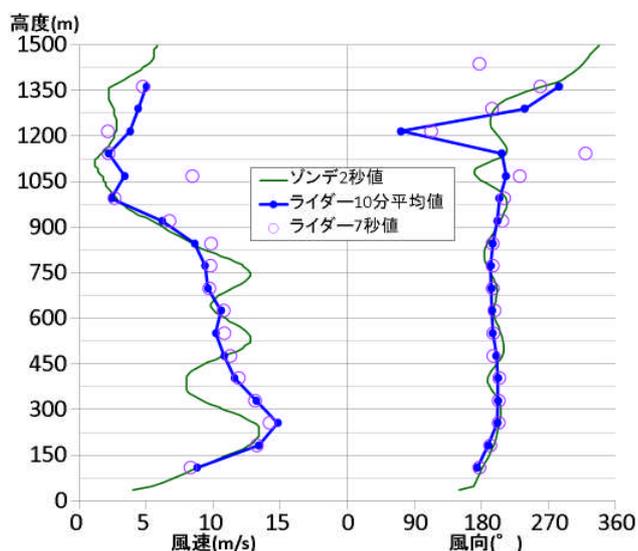
図10　2011年9月7日20時30分のゾンデとライダーの比較

4．5　ライダー観測とウィンドプロファイラ観測との比較例

ウィンドプロファイラはライダーと同様に下層大気の風の鉛直分布を連続的に測定することができる．2011年10月7日のライダーの観測結果と水戸のウィンドプロファイラによる観測結果を，今回作成したビューワで表示したものを図13に示す．

ライダーとウィンドプロファイラは約50km離れて設置されているため，同一の大気現象を観測しているものではないが，ライダーは鉛直分解能が75mと細かく，ウィンドプロファイラ(鉛直分解能300m)では捉えきれない大気下層の詳細な風の変化の様子を捉えることができる．
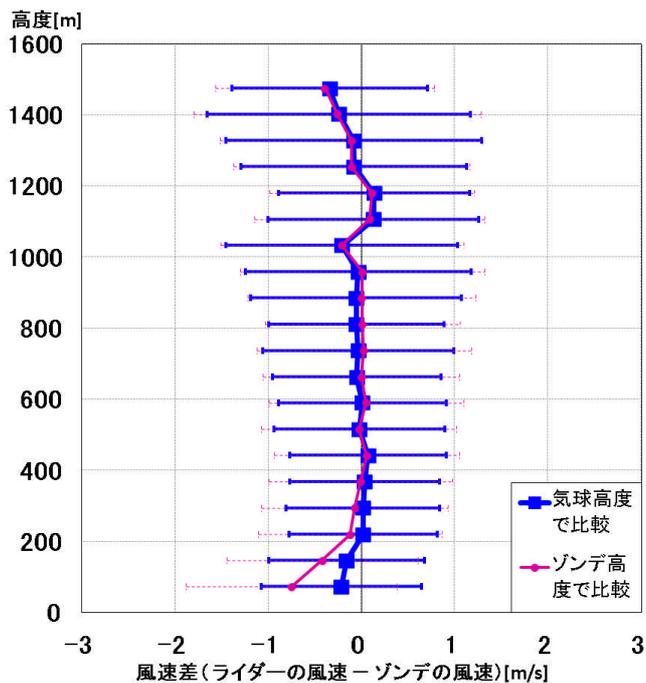
図11　ライダー観測とGPSゾンデ観測の風速差の鉛直分布(2009年12月～2011年12月の平均)

エラーバーは風速差の標準偏差範囲を示す．
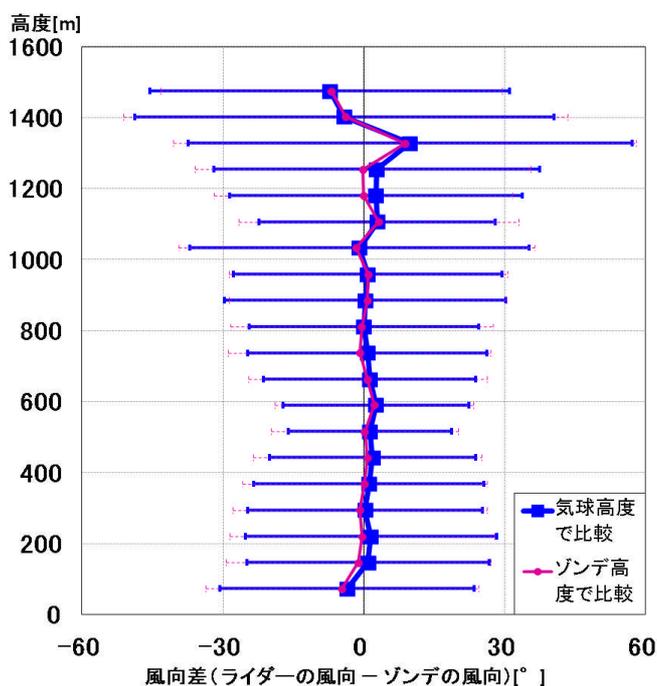
図12　ライダーとGPSゾンデの風向差の鉛直分布(2009年12月～2011年12月の平均)

エラーバーは風向差の標準偏差範囲を示す．
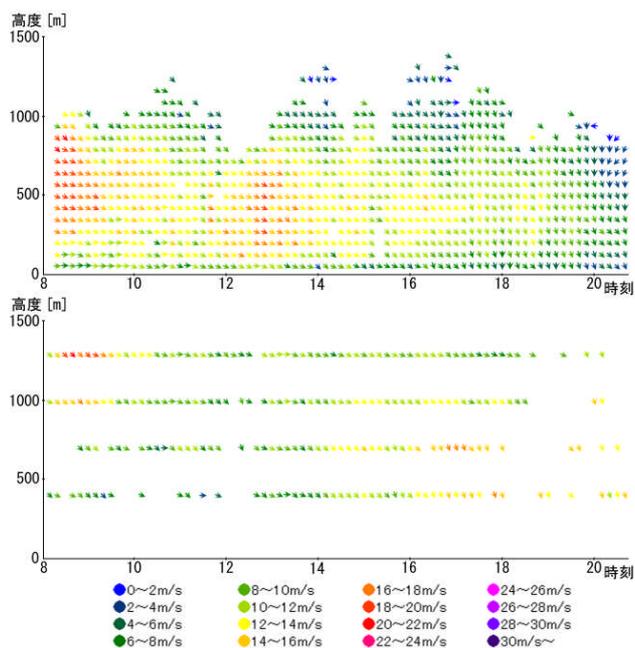
図13　2011年10月7日のライダー観測結果(上図)とウィンドプロファイラ観測結果(下図)の比較

図14　混合層の発達の様子(2011年9月29日)

左図はライダー観測結果で，破線は混合層と安定層の境界と考えられる部分．右図は8時30分飛揚のGPSゾンデ観測結果．

４．６ 小スケール大気変動の捕捉例

ライダーが捉える事ができる小さなスケールの大気の変動として，日射による混合層の発達と考えられる例を紹介する．2011年9月29日の8時から12時までのライダー観測と8時30分放球のGPSゾンデ観測の結果を図14に示す．

ライダーの観測を開始した午前8時10分頃は，第1層の150m付近から高度1000m付近にかけて均一な北東風の安定層の場となっているが，時間の経過と共に地表付近から徐々に風向が乱れはじめ，それが9時頃にかけて徐々に上層に広がっていく様子がわかる．これは，日射によって地表面が暖められて対流による撹乱が起き，安定層が混合層へと移行していく状態を捉えたものであると考えられる．8時30分放球のGPSゾンデ観測では高度190m付近に逆転層があり，これより下層では温位がほぼ一定で混合層であることがわかるが，これは8時30分のライダーの観測による混合層の高さと良く一致している．

５．まとめ

ライダー観測データの品質管理を行う品質管理アルゴリズムを作成し，これによって得られたデータセットを用いてライダーによる風観測の性能評価を行った．その成果は次の通りである．

①GPSゾンデ観測結果との一致性が良いことが分かった．同時にウィンドプロファイラ観測よりも高度方向に細かい現象を捉えられる等，ライダー観測の有用性が示された．

②データセットの表示ビューワを使うことにより，風の変動状況を視覚的に確認し，大気の様子を容易に把握することができるようになった．

③ライダーによる連続観測を行いこのビューワで確認することで，これまでは観測が困難であった下層大気の詳細な風の変動を準リアルタイムに把握できるようになった．これにより，大雨をもたらす対流の発生初期の大気下層の風の変化などの検出に利用することが期待される．

また，今回のライダー観測データの品質管理に用いたアルゴリズムや閾値として用いたパラメータを，状況に応じて変えることで，さらに高品質な風の鉛直分布を求められることがわかっている．例えば，風速算出に利用するデータの閾値を観測領域の下層と上層で変えることで，不自然な観測データを排除しつつより多くの正常データを残すことができると考えられ，今後こうした改良を行っていく予定である．また，今回はライダー観測装置で算出された風向風速データをもとに解析を行ったが，他に得られる視線データやS/N比を利用して品質管理を行うことにより，更なる風観測結果の精度向上が見込まれる．

謝　　辞

本稿を草するに際し，観測第一課の森一正課長，観測第二課の小城良友課長，能登美之主任技術専門官，中野辰美技術専門官に数々のご助言を賜った．また，観測第二課の方々には日々の観測データ取得に御協力を頂いた．厚くお礼申し上げます．

引 用 文 献

高層気象台(2011) : 明星電気 RS2-91 型レーウィンゾンデとヴァイサラ RS92-SGP 型 GPS ゾンデの相互比較試験観測と検証結果．測候時報, **78**, 6, 221 - 257.
青柳　二郎(1986) : 単一ドップラーレーダによる上層風の測定．気象研究所技術報告, **19**, 36 - 59.
三菱電機株式会社(2009) : 高層観測比較用ドップラーライダーの製作及び設置(高層気象台)LR-09FⅢS 取扱説明書.